

UTVECKLING AV ALTERNATIVA BELÄGGNINGS- KONSTRUKTIONER

Ettapp 1a



Anders Gudmarsson

2015-07-22

FÖRORD

Utveckling av alternativa beläggningskonstruktioner är ett branschgemensamt projekt med representanter från merparten av de aktörer som finns på marknaden inom beläggningssverige. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond och Trafikverket har bidragit med den huvudsakliga finansieringen av Etapp 1a.

Projektledare i Etapp 1a har varit Lennart Holmqvist och följande personer har ingått i styrgruppen: Peter Gustafsson, Peab Asfalt; Torsten Nordgren; Mats Wendel, Trafikverket/Peab Asfalt; Uffe Mortensen, Pankas; Safwat Said, VTI; Anders Gudmarsson, Peab Asfalt/KTH samt Roger Nilsson, Skanska. Den rubricerade rapporten har granskats internt på Peab Asfalt.

Provningen av projektets ingående material har i Etapp 1a utförts av Petri Uhlback och Hannes Jonsson på Nynas AB samt av Michael Langfjell, Martin Rydh och Erik Averland på Peab Asfalt AB.

Tack till alla som bidragit med kunskap och underlag till denna rapport.

Anders Gudmarsson

Stockholm, Juni 2015

SAMMANFATTNING

Modifierade bindemedel med förbättrade deformations- och utmattningsegenskaper erbjuder nya möjligheter i valet av beläggningskonstruktioner och dess lagertjocklekar. För att kunna nyttja dessa moderna material krävs nya erfarenheter i kombination med god materialkännedom eftersom nuvarande dimensioneringsverktyg är begränsade till traditionella material. Detta projekt syftar till att undersöka hur moderna material i alternativa konstruktioner står sig i jämförelse mot traditionella beläggningskonstruktioner. Syftet med Etapp1a är att undersöka och välja ut lämpliga bindemedel till provsträckorna som ska jämföras mot varandra.

I denna rapport redovisas resultat av laboratorieprovning av modifierade och omodifierade bindemedel. Provningsen av deformationsegenskaper (MSCR) och komplex skjuvmodul utförda i en Dynamic Shear Rheometer tydliggör de förbättrade egenskaper som polymermodifierade bindemedel har i jämförelse mot traditionella omodifierade bindemedel. De polymermodifierade bindemedlen resulterar exempelvis i en högre dynamisk skjuvmodul vid låga belastningsfrekvenser och höga temperaturer vilket indikerar en förbättrad deformationsresistans jämfört mot de omodifierade bindemedlen.

Baserat på resultaten av bitumenprovningarna samt utifrån tidigare erfarenheter har bindemedel valts till fyra provsträckor som ska jämföras mot en referenssträcka. Dimensioneringen av referenssträckan bestående av en 19 cm tjock beläggning ger en uppskattad livslängd på 26 år. Livslängden för provsträcka 1 där tjockleken reducerats med ett lager till 14 cm uppskattas till 10 år. Provsträckorna med polymermodifierade beläggningar antas ha en livslängd längre än 10 år.

INNEHÅLL

1.	INLEDNING.....	4
2.	BAKGRUND OCH SYFTE	4
3.	METODIK	5
3.1	INTERNATIONELLA OCH NATIONELLA ERFARENHETER.....	5
3.2	MATERIAL OCH PROVNING	6
4.	RESULTAT	7
4.1	KOMPLETT BINDEMEDELSANALYS	7
4.2	MULTIPLE STRESS CREEP RECOVERY	10
4.3	KOMPLEX SKJUVMODUL	12
5.	ANALYS	17
5.1	VAL AV BELÄGGNINSKONSTRUKTIONER	17
5.2	DIMENSIONERING	18
6.	SLUTSATS	19
	LITTERATURFÖRTECKNING	20

1. INLEDNING

Gemensamt för vägkonstruktioner runt om i världen är att den konventionella dimensioneringen av beläggningstjockleken ofta är starkt baserad på många års empiriska studier. Osäkerheter i både prediktering av trafikmängder och de ingående materialens egenskaper har gjort att den empiriska kunskapen är mycket betydelsefull i valet av lämpliga beläggningskonstruktioner. Den erfarenhetsbaserade dimensioneringen tenderar dock att resultera i konservativa konstruktioner med små möjligheter till att optimera beläggningstjockleken (Timm et al. 2014). Dessutom blir konstruktionerna låsta till traditionella material och konstruktioner med erfarenhetsmässigt kända egenskaper.

Samtidigt har intresset för att kunna förlänga livslängden av vägar, alternativt optimera beläggningstjockleken i vägkonstruktioner, drivit fram en utveckling av nya bindemedel med förbättrade egenskaper. Dessa bindemedel kan tåla större påfrestningar genom att vara mer flexibla och ha en minskad temperaturkänslighet. Förbättrad deformationsresistens och minskad sprickbildning är påvisade effekter. Med dagens erfarenheter och kunskap kan dock dessa material inte utnyttjas till att prediktera en optimerad beläggningstjocklek.

Ett behov av att utveckla metoder för att tillförlitligt kunna påvisa fördelarna med användningen av t.ex. polymermodifierade bindemedel i beläggningar har sedan tidigare identifierats (e.g. Roque et al. 2005). Utvecklingen och användningen av mer mekanistiska metoder har dock visat sig vara mycket komplex och denna typ av dimensionering kräver också en kalibrering mot verkliga resultat. För att kunna dra nytta av nya material med förbättrade egenskaper behövs därför fullskaleförsök där olika beläggningskonstruktioner kan jämföras mot varandra. Nya erfarenheter i kombination med god materialkännedom behövs för att kunna utveckla nya effektivare beläggningskonstruktioner. Antingen genom minskad tjocklek eller genom förlängd livslängd.

Målet med detta projekt är att bidra med ny erfarenhet om hur moderna material i alternativa konstruktioner står sig i jämförelse mot traditionella beläggningskonstruktioner.

2. BAKGRUND OCH SYFTE

Projektet är uppdelat i tre etapper (Etapp 1a - c) där de alternativa beläggningskonstruktionerna med moderna material som har identifierats och valts ut i Etapp 1a, ska undersökas och analyseras i Etapp 1b, samt följas upp över en längre period i Etapp 1c. Syftet med Etapp 1a är att ta fram och utvärdera högpresterande bindemedel genom laboratorieprovingar. Dessa laboratoriestudier samt studier av egna och internationella erfarenheter ligger till grund för valen av material och konstruktionstyper i Etapp 1a. I Etapp 1b ska samtliga färdigställda sträckor undersökas och analyseras för en första jämförelse mellan de valda konstruktionerna. Detta kommer att utgöra basen för en fortsatt långtidsuppföljning som sker i Etapp 1c. Etapp 1a - c ses som en förstudie som kan bidra med ingående parametrar till nya fullskaleförsök.

Det övergripande syftet med hela projektet är att i fullskala demonstrera och undersöka om användandet av nyare kunskap kan leda till effektivare och robustare vägkonstruktioner. Projektet kommer att ha en kunskapshöjande effekt för branschen och kommer att ge beställare, konsulter och entreprenörer bättre kunskap om hur nya material kan effektivisera vägbyggandet. I förlängningen kan det leda till mindre risktagande och bättre anbud, kanske särskilt vid totalentreprenader.

3. METODIK

3.1 Internationella och nationella erfarenheter

I ett flertal länder används polymermodifierade bindemedel rutinmässigt i slitlagren för att förbättra deformationsegenskaperna i beläggningar (Scholten et al. 2011; Timm et al. 2011). Motivet till att vanligtvis endast de övre lagren innehåller polymermodifierade bindemedel är att topplagret utsätts för ett större temperaturspann och mer extrema skjuvspänningar i jämförelse mot bind- och bärlagren. Studier och försök har dock visat att en starkt bidragande faktor till möjligheterna att reducera tjockleken av de bundna lagren är att även använda polymermodifierade bindemedel i bärlagren. (Kluttz et al. 2009; Scholten et al. 2011). Det finns ett flertal exempel utanför Sverige där prestandan av polymermodifierade bitumen har jämförts mot konventionella material (Von Quintus et al. 2007). Resultat från exempelvis NCAT (National Center for Asphalt Technology) teststräcka i Auburn, USA har visat på tydliga förbättringar i beläggningars motstånd mot permanenta deformationer vid användning av höga polymerhalter i bindemedlen (Scholten et al. 2011). I denna studie jämfördes en sektion med högmodifierat bindemedel (7.5 % SBS) i samtliga bundna lager mot en sektion bestående av ett omodifierat bärlager och modifierade bind- och slitlager men med en lägre (vanligare) polymerhalt. Trots att de bundna lagren i den högmodifierade sektionen var ca 35 mm tunnare resulterade denna sektion i 4-5 mm mindre spår djup i jämförelse mot referenssektionen efter två års belastning (Scholten et al. 2011; Timm et al. 2011).

Teststräckor med polymermodifierade bindemedel har även byggts i Sverige, där E6 norr om Uddevalla (Geddeknippel – Kalsås) är ett exempel. Längs denna sträcka har omodifierade referenssträckor jämförts mot olika polymermodifierade asfaltmassor. I den södergående sträckningen har polymermodifierade bindemedel använts i samtliga bundna lager på vissa sektioner, medan det enbart användes i slitlagret i den norrgående sträckningen (Lu et al. 2014). Återvunnet bindemedel från borrhärdar i bärlagret visade att bitumen med en polymerhalt på 6 % hade en högre bibehållen penetration i jämförelse mot det omodifierade bindemedlet vilket kan indikera på en mindre åldringsbenägenhet. Denna effekt kunde däremot inte ses för de lågmodifierade bindemedlen. Resultat från laboratorieprovning i förstudien till E6 projektet indikerade via dynamisk krypstabilitet att en låg polymerhalt i ett mjukt bitumen inte förbättrade deformationsegenskaperna. Dessutom visade styvhetsmodulmätningar att en låg polymerhalt inte nämnvärt bidrog till en minskad temperaturkänslighet, medan en högre polymerhalt gav en avsevärt lägre temperaturkänslighet (Stenberg 2007). En låg temperaturkänslighet är viktig på grund av att ett minskat temperaturberoende i asfalten leder till bättre sprick- och deformationsegenskaper. I dagens läge är samtliga sektioner längs provsträckan på E6 i god kondition och endast små skillnader i spår djup har mätts upp (Lu et al. 2014).

En annan intressant teststräcka i Sverige är utförd vid Ragn-Sells anläggning i Heljestorp i närheten av Trollhättan. Infarten till denna anläggning består delvis av provsträckor med gummimodifierad asfalt. Provytorna byggdes under hösten 2011 och tidiga resultat indikerar på förbättrade utmattningssegenskaper för de gummimodifierade sträckorna i jämförelse mot referenskonstruktionen (Said et al. 2014). Det ska dock nämnas att fortsatt uppföljning krävs för att säkerställa eventuell förbättrad prestanda.

Resultat från både internationella och nationella erfarenheter talar för att använda ett högmodifierat bindemedel i en av de alternativa beläggningsskonstruktionerna i detta projekt. Det är också av intresse att jämföra en konstruktion med genomgående styvare bindemedel mot en traditionellt svensk konstruktion med ett mjukare bindemedel i bärlagret. Detta på grund av att andra länder ofta använder styvare bärlager, än vad som normalt används i Sverige, med goda resultat.

3.2 Material och provning

De olika beläggningstyperna som kommer att jämföras i detta projekt består av samma stenmaterial och kornkurvor (AG 22, ABb 22, ABS 16). Skillnaderna mellan konstruktionerna är att olika bindemedelstyper används i de olika asfaltmassorna. Följande bitumensorter har varit aktuella för utvärdering i denna etapp:

- Gummimodifierat bitumen
- Polymermodifierat bitumen 45/80-65 (4 % SBS polymerer)
- Polymermodifierat bitumen 25/55-80 A (8 % SBS polymerer)
- Polymermodifierat bitumen 25/55-80 B (7.5 % SBS polymerer)
- Polymermodifierat bitumen 25/55-80 C (blandning av SBS polymerer och Sasobit)
- Penetrationsbitumen 50/70
- Penetrationsbitumen 70/100
- Penetrationsbitumen 160/220

Då det under projektets gång visade sig att den gummimodifierade asfaltmassan inte kunde levereras i samband med byggnationen av provvägen valdes detta alternativ bort i samråd med beställare och leverantör. Ingen utvärdering har därför utförts av det gummimodifierade bindemedlet. 50/70, 70/100 samt 160/220 är konventionella omodifierade bindemedel där penetrationsvärdet (1/10 mm) styr beteckningen. 45/80-65 är ett bindemedel med 4 vikt-% inblandade SBS-polymerer där penetrationen skall vara inom 45 – 80 tiondelsmillimeter och där 65 är minimikravet för mjukpunktsvärdet. Samma beteckning gäller även för de tre polymermodifierade bindemedlen som benämns 25/55-80 A-C.

Utvecklingen och processen för att välja ut lämpliga modifierade bindemedel har skett i flera steg. Exempelvis så är 25/55-80 B utvecklad med utgångspunkt från 25/55-80 A. Den ursprungliga tanken för 25/55-80 A var att använda ett hårt basbitumen med en penetration omkring 25-30 och en hög polymerhalt (8 %) för att förbättra deformationsegenskaperna och samtidigt erhålla en god elasticitet. Provningar utförda efter korttidsåldring (RTFOT) visade dock att detta ledde till ett för styvt bitumen med icke önskvärd elasticitet. Korttidsåldring genom RTFOT motsvarar den åldring en asfaltmassa utsätts för under produktion till färdig nylagd beläggning. För att bibehålla goda egenskaper efter RTFOT justerades därför 25/55-80 A. Till det justerade bindemedlet med benämning 25/55-80 B valdes ett mindre hårt basbitumen (~35-45) i kombination med en reducering av polymerhalten med 0.5 procentenheter (7.5 %). Höga polymerhalter (7-8 %) medför ofta problem med packningsbarheten och bearbetbarheten av asfaltmassorna. I ett försök att reducera dessa problem har en specialanpassad polymer (Kraton Polymers) använts i 25/55-80 A och B bindemedlen. Samma polymer har även använts vid NCAT teststräcka i Auburn, USA (Scholten et al. 2011). Bindemedlet 25/80-55 C skiljer sig mot de övriga polymermodifierade bindemedlen genom att det består av en blandning av SBS polymerer och Sasobit (vax). Det låg- och de två högmodifierade bindemedlen samt 25/55-80 C består av olika sorters SBS polymerer.

Följande bindemedelsprovningar har utförts på de aktuella produkterna för att kontrollera och säkerställa dess egenskaper:

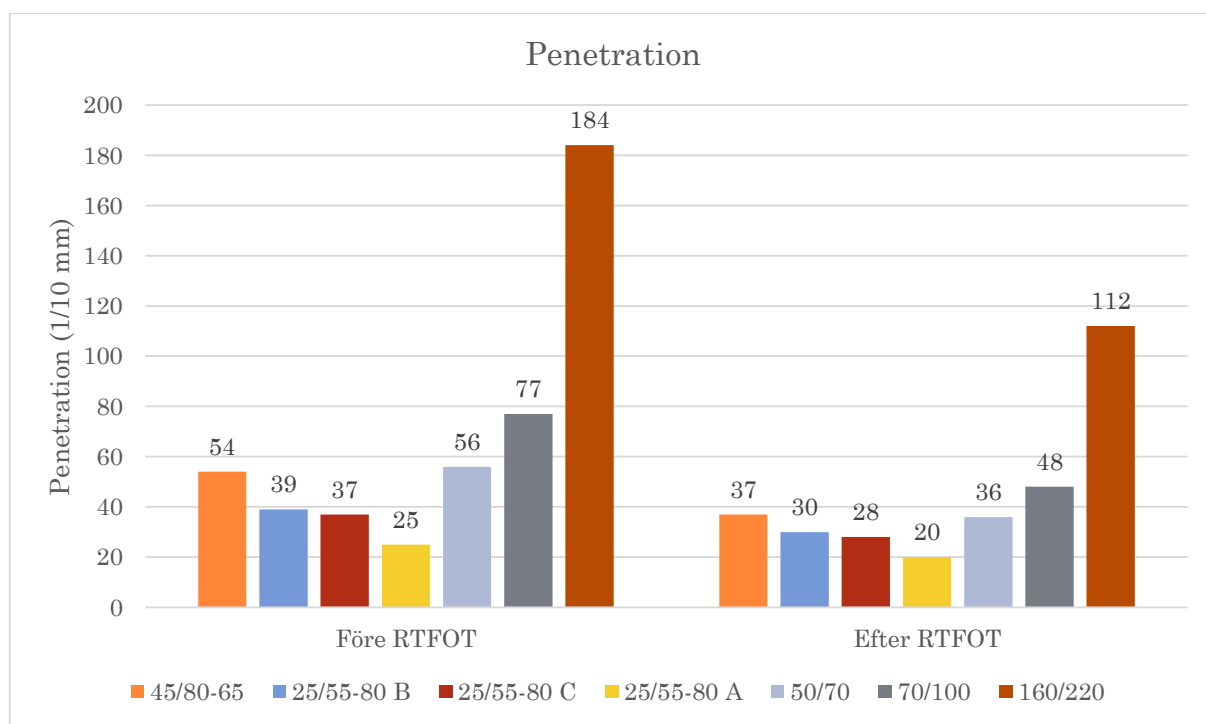
- Kompletta bindemedelsanalys enligt Trafikverkets specifikationer för penetrationsbestämda och polymermodifierade bitumen (TRVKB 10 Bitumenbundna lager, TDOK 2011:266)
- Provning av komplex skjuvmodul (temperatur- och frekvenssvep) i en Dynamic Shear Rheometer (DSR) på både modifierade och omodifierade bindemedel.
- Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) test i en DSR på de polymermodifierade bindemedlen.

4. RESULTAT

4.1 Kompletta bindemedelsanalys

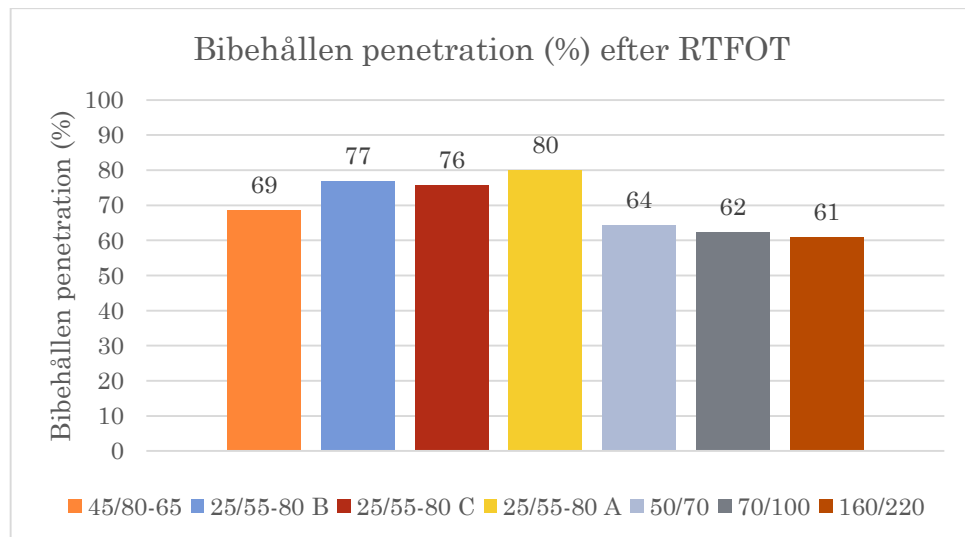
Från den kompletta bindemedelsanalysen enligt Trafikverkets specifikationer presenteras jämförande resultat från penetrations- och mjukpunktsprovning som är två av de få metoder som gäller för både penetrationsbestämda- och polymermodifierade bitumen. Dessutom presenteras elastisk återgång för de polymermodifierade bindemedlen. Dessa provningar är allmänt kända och testförfarandet finns beskrivet i respektive metodstandard (SS-EN 1426:2007; SS-EN 1427:2007; SS-EN 13398:2010).

Figur 1 visar penetrationsvärden före och efter korttidsåldring genom RTFOT för samtliga bindemedelstyper som har varit aktuella för användning i provsträckan. Det högmodifierade (8 %) bindemedlet (25/55-80 A) resulterade i ett mycket lågt penetrationsvärde vilket kan indikera att detta bindemedel är aningen för styvt om inte elasticiteten kan bibehållas genom de inblandade polymererna. Som tidigare nämnts tillverkades på grund av detta även 25/55-80 B som resulterade i ett något högre penetrationsvärde i jämförelse mot 25/55-80 A. Samtliga penetrationsvärden före RTFOT ligger inom de krav som gäller för respektive klassificering.



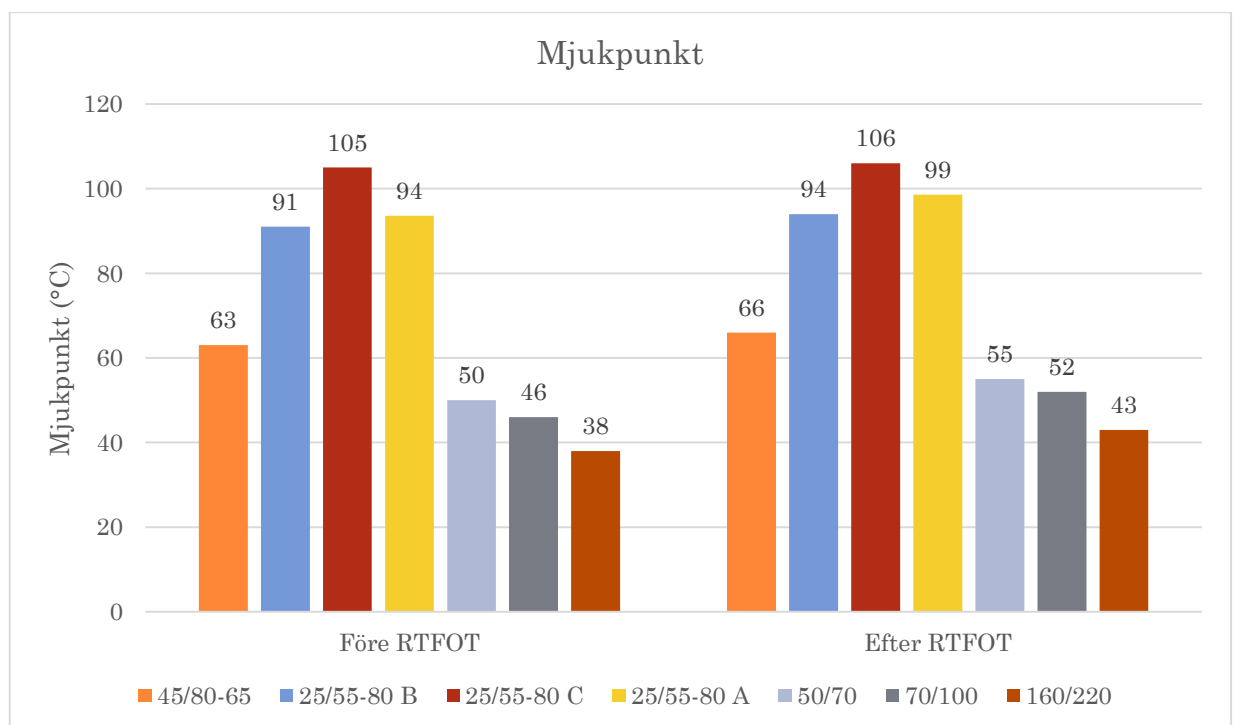
Figur 1. Penetration före och efter korttidsåldring (RTFOT) för samtliga bindemedel

I Figur 2 presenteras den bibehållna penetrationen efter korttidsåldring genom RTFOT. Det är önskvärt med höga procenttal på den bibehållna penetrationen eftersom det tyder på en lägre åldringsbenägenhet vilket kan ge en längre livslängd. Trenden i dessa resultat är att de hårdare polymerbindemedlen får en högre bibehållen penetration. Samtliga omodifierade penetrationsbindemedel klarar de krav som finns på bibehållen penetration enligt Trafikverkets specifikationer (TRVKB 10 Bitumenbundna lager, TDOK 2011:266). Inga krav finns för polymermodifierade bindemedel.

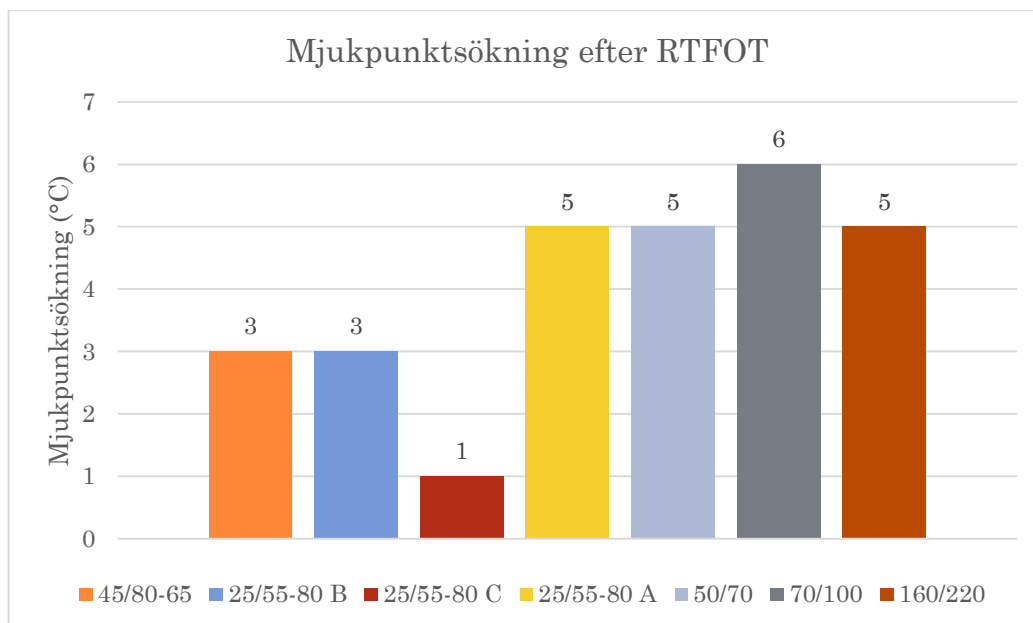


Figur 2. Bibehållen penetration efter korttidsåldring (RTFOT) för samtliga bindemedel

Figur 3 och 4 presenterar mjukpunkt före och efter RTFOT respektive mjukpunktsförändringen efter RTFOT. En högre mjukpunkt tyder på bra deformationsegenskaper. En hög mjukpunktsförändring efter RTFOT kan dock indikera på ett åldringsbenäget bindemedel som kan leda till sprickbildning. Resultaten följer trenden för penetrationen med att de hårdare polymerbindemedlen ger en lägre mjukpunktsökning än de omodifierade bindemedlen med undantag för 25/55-80 A. Samtliga bindemedel klarar de krav som ställs enligt TDOK 2011:266.

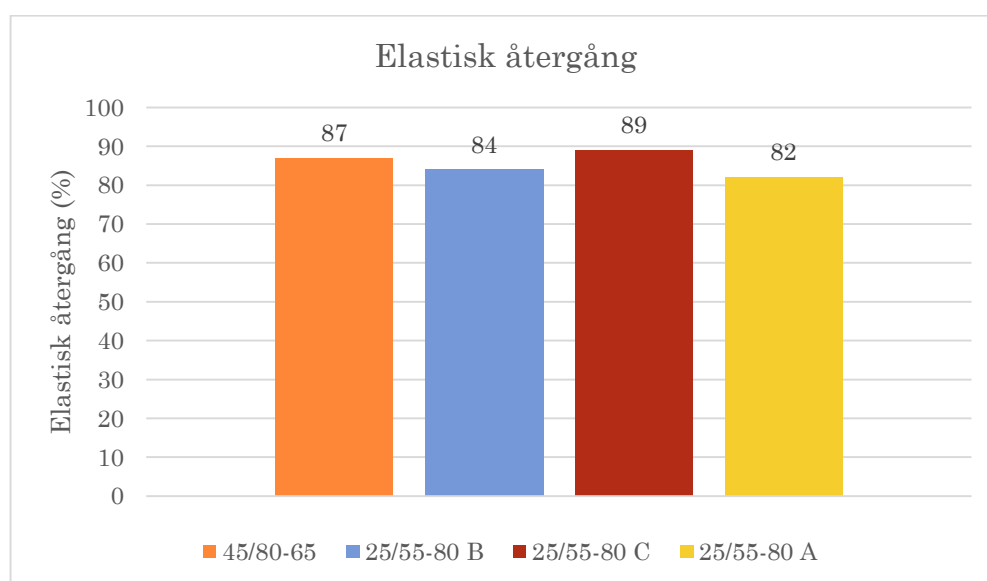


Figur 3. Mjukpunkt före och efter korttidsåldring (RTFOT) för samtliga bindemedel



Figur 4. Mjukpunktsförändring efter korttidsåldring (RTFOT) för samtliga bindemedel

Figur 5 visar den elastiska återgången för de polymermodifierade bindemedlen vid 25 °C. De fyra modifierade bindemedlen visar alla resultat mellan 80-90 %.



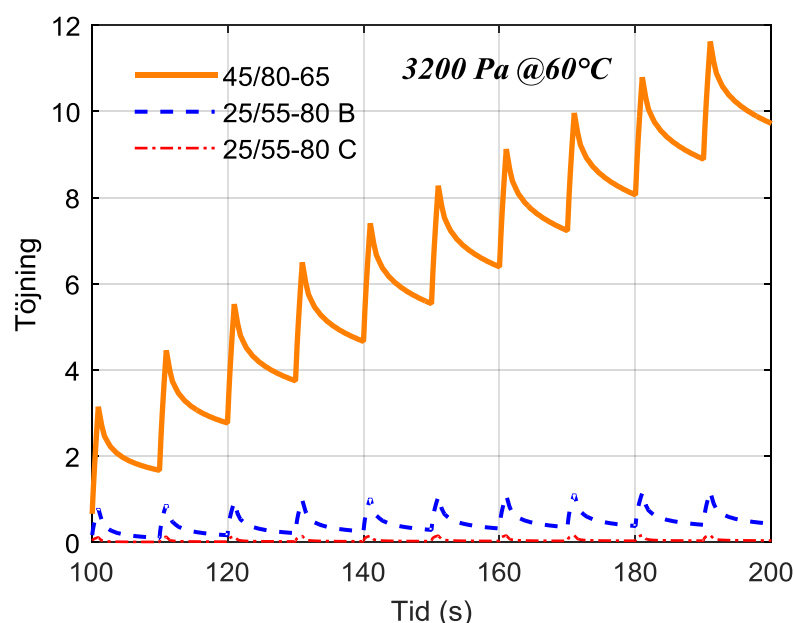
Figur 5. Elastisk återgång för de polymermodifierade bindemedlen

Den kompletta bindemedelsanalysen visar på skillnader mellan bindemedlen men det är generellt svårt att tydliggöra viktiga skillnader mellan modifierade och omodifierade bindemedel genom att undersöka penetration, mjukpunkt m.m. enligt Trafikverkets specifikationer. Utifrån den kompletta bindemedelsanalysen uteslöts 25/55-80 A från fortsatt provning och fokus lades istället på den vidareutvecklade 25/55-80 B i den fortsatta jämförelsen mot övriga bindemedel.

4.2 Multiple Stress Creep Recovery

Multiple Stress Creep Recovery (MSCR) är ett test som anses kunna karakterisera deformationsegenskaper av omodifierade och modifierade bindemedel (Asphalt Institute 2010). En skjuvspänning tillförs vid två olika spänningsnivåer för att undersöka den elastiska responsen i materialet. Belastningen tillförs under 1 sekund och därefter tillåts provet att återhämta sig under 9 sekunder. Tio belastnings- och återhämtningscykler utförs vid varje spänningsnivå med början på den lägre spänningsnivån, 0,1 kPa, som därefter följs av den högre nivån, 3,2 kPa. Från detta test utvärderas två parametrar som beskriver elasticitet och deformationsegenskaper - nämligen återgång av kryptöjningen (%) och icke-återgående krypkomplians ($1/\text{kPa}$) från tillförd belastning. Ett bitumen med god elasticitet och bra deformationsegenskaper har höga värden för töjningsåtergången och låga värden för den icke-återgående krypkompliansen (J_{nr}).

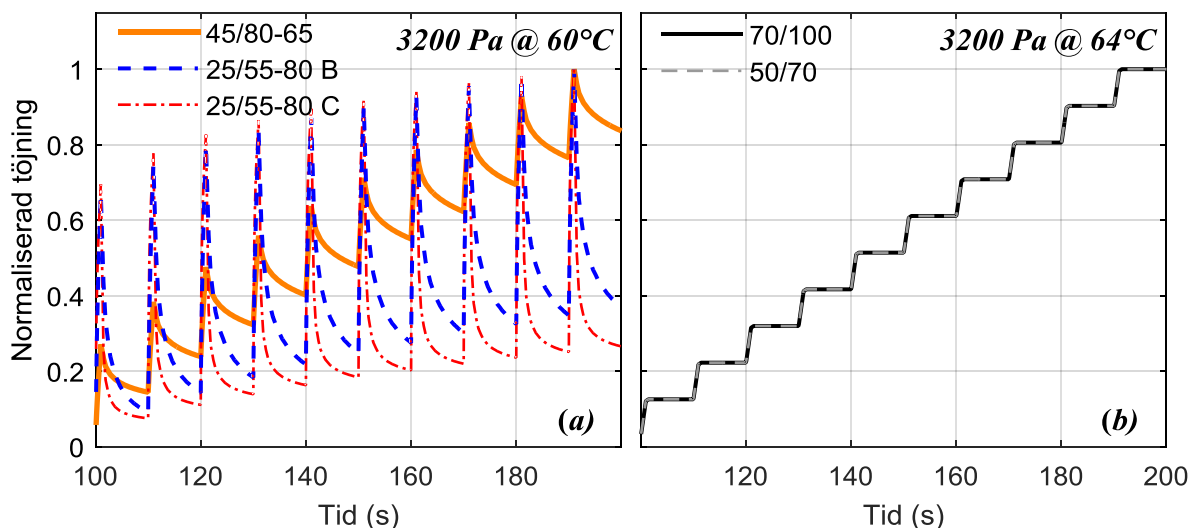
Figur 6 visar töjningsresponsen vid 60 °C från upprepade 1 sekunders pålastningar om 3.2 kPa följt av 9 sekunders återhämtning innan nästa belastning. En markant skillnad i respons är tydlig mellan de polymermodifierade bindemedlen där töjningen för 45/80-65 inte återgår med samma hastighet som för 25/55-80 B och 25/55-80 C. Detta bidrar till en större töjningsutveckling för 45/80-65.



Figur 6. Respons från upprepade belastningar med viloperioder vid 60 °C

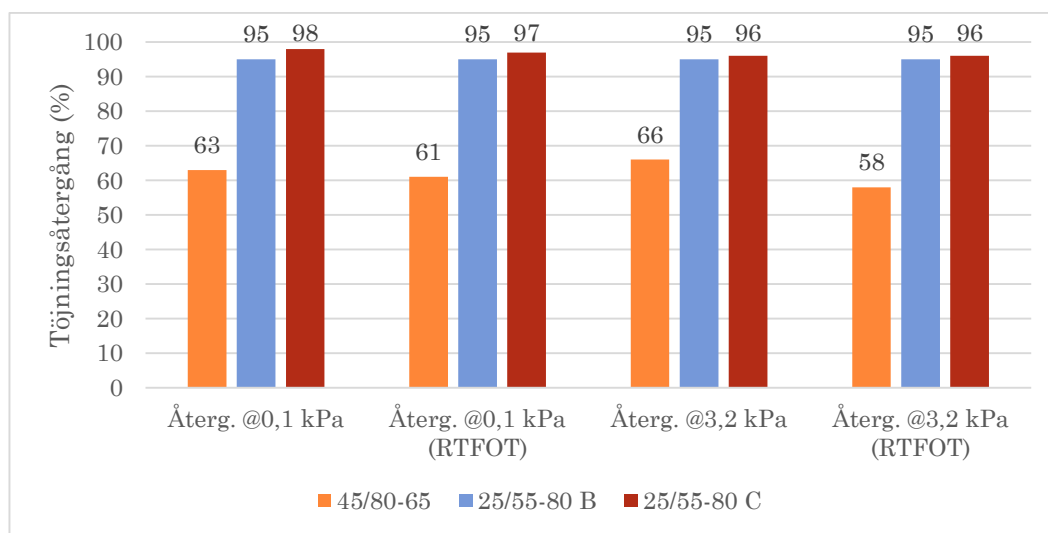
Figur 7a visar samma resultat där töjningen har normaliserats för att tydliggöra skillnaderna i töjningsåtergång mellan bindemedlen. 25/55-80 B och C visar här en överlägsen återgång i jämförelse mot 45/80-65.

I Figur 7b presenteras även MSCR resultat av 50/70 och 70/100 bitumen testat vid 64 °C. Även om dessa bindemedel är testade vid olika temperaturer så är det intressant att se att de omodifierade bindemedlen inte återgår överhuvudtaget i viloperioderna under detta test. Detta ger en indikation om de polymermodifierade bindemedlens förbättrade deformationsegenskaper.



Figur 7. Normaliserad respons från upprepade belastningar med viloperioder för polymermodifierade bindemedel vid 60 °C (a) och för omodifierade bindemedel vid 64 °C (b)

Figur 8 och Tabell 1 visar den beräknade töjningsåtergången respektive värdena på icke-återgående krypkomplians (J_{nr}) för tre polymermodifierade bindemedel. En tydlig skillnad finns mellan 45/80-65 och de övriga bindemedlen med högre polymerhalt. De två bindemedlen med hög polymerhalt visar mycket höga värden på återgången både före och efter RTFOT. Som en referens till de polymermodifierade bindemedlen kan det nämnas att tidigare MSCR provning av penetrationsbitumen (50/70 och 70/100) vid 64 °C resulterade i en töjningsåtergång på 0 % (Ekblad och Lundström 2014).



Figur 8. Töjningsåtergång före och efter RTFOT

De beräknade värdena för J_{nr} som presenteras i Tabell 1 visar att bindemedlet 25/55-80 C har bäst deformationsegenskaper med sina låga J_{nr} -värden. De båda högmodifierade bindemedlen (25/55-80 B och C) har betydligt lägre värden än 45/80-65. Rapporterade värden av J_{nr} på omodifierade penetrationsbindemedel vid 64 °C ligger mellan 1.6 till 2.4 vilket är väsentligt högre än de polymermodifierade bindemedlen (Ekblad och Lundström 2014).

Tabell 1. Icke-återgående krypkomplians (J_{nr}) före och efter RTFOT vid 60 °C

Bitumen	J_{nr} (1/kPa)			
	@0.1 kPa	@0.1 kPa (RTFOT)	@3.2 kPa	@3.2 kPa (RTFOT)
45/80-65	0.31	0.19	0.29	0.21
25/55-80 B	0.012	0.005	0.013	0.006
25/55-80 C	0.0005	0.0003	0.0014	0.0007

4.3 Komplex skjuvmodul

För att kunna påvisa skillnader i de olika bindemedlens prestanda vid olika klimat är det av yttersta vikt att mäta den komplexa skjuvmodulen (G^*) vid flera olika temperaturer och belastningsfrekvenser. Detta utförs genom att ett bitumenprov placeras mellan två parallella plattor och utsätts för en oscillerande skjuvning. Skjuvprovet genomfördes vid ett flertal vinkelhastigheter inom intervallet 0.1 till 100 rad/s (~0.016 till 16 Hz) och upprepades för tio olika temperaturer från 10 till 100 °C.

Den komplexa modulen består av en elastisk styvhet och en viskös dämpning. Styvheten för bindemedel presenteras ofta i form av den dynamiska skjuvmodulen $|G^*|$ och dämpningen presenteras ofta i form av fasvinkeln där en högre fasvinkel innebär en större viskös dämpning.

För omodifierade bindemedel kan oftast den uppmätta komplexa modulen skiftas till en unik kontinuerlig kurva (en masterkurva). Detta är möjligt genom att en modul som mäts vid exempelvis en låg temperatur och en låg frekvens är densamma vid någon högre frekvens och högre temperatur. Material som uppvisar detta beteende kallas för termoreologiskt enkla material. För dessa material är det intressant att passa en modell till den uppmätta komplexa modulen, så att all mätdata kan uttryckas vid en specifik temperatur eller frekvens. Genom detta kan den komplexa modulen över ett brett spektrum (masterkurvan) jämföras för olika material vid en valfri temperatur (eller frekvens). Figur 9 visar den komplexa modulen för 70/100 bindemedlet där 2S2P1D modellen enligt ekvation 1 har passats till mätningarna (Di Benedetto et al. 2004).

$$G^*(\omega, T) = G_0 + \frac{(G_\infty - G_0)}{1 + \delta(i\omega\alpha_T\tau)^{-k} + (i\omega\alpha_T\tau)^{-h} + (i\omega\alpha_T\beta\tau)^{-1}}, \quad (1)$$

där

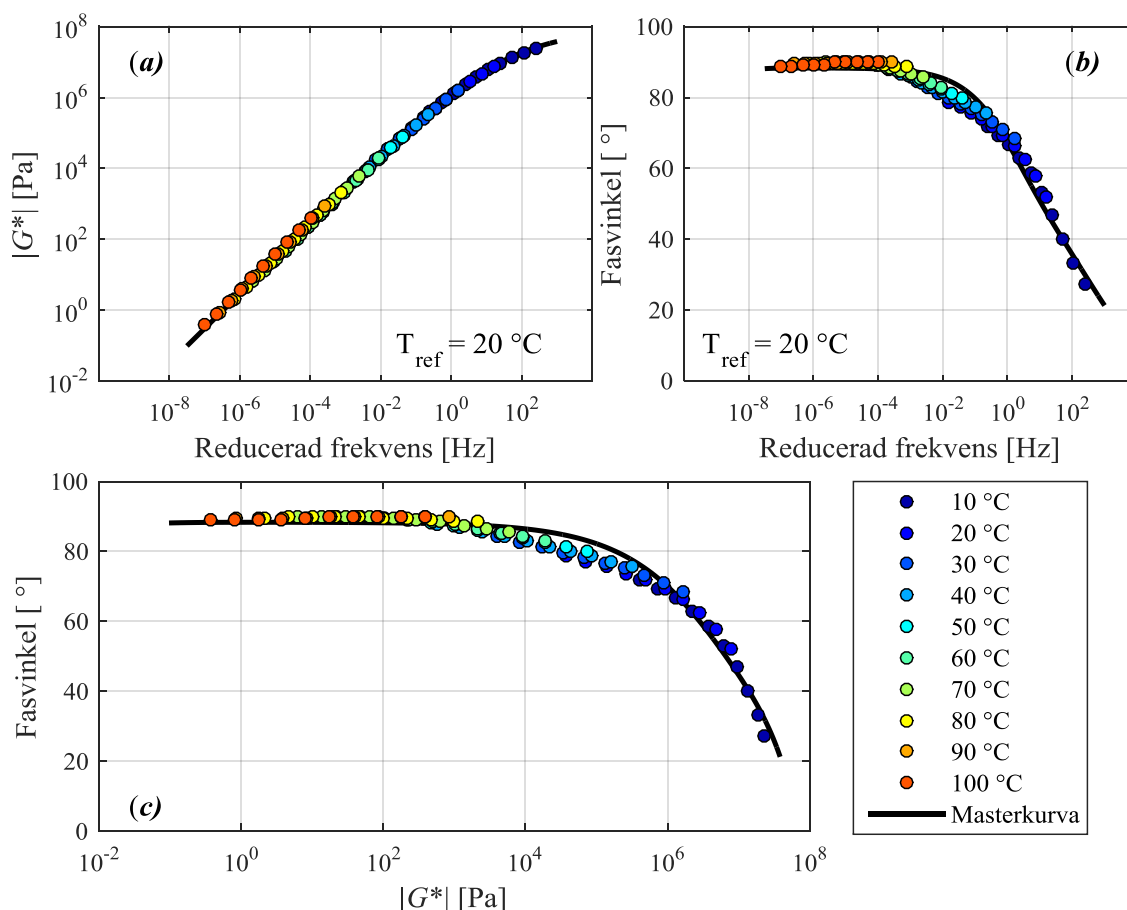
- G_0 = statisk modul/modul vid låga frekvenser
- G_∞ = maximal modul/modul vid höga frekvenser
- ω = vinkelhastigheten ($2\pi f$)
- δ och β = konstanter
- k och h = exponenter enligt $0 < k < h < 1$
- τ = temperaturberoende karakteristisk tid
- i = imaginära enheten definierad enligt $i^2 = -1$

Skiftfaktorn (α_T) som används för att skifta den komplexa modulen till en kontinuerlig kurva beräknas från WLF modellen enligt ekvation 2 (Williams et al. 1955).

$$\log \alpha_T(T) = \frac{-c_1(T - T_{ref})}{c_2 + T - T_{ref}}, \quad (2)$$

där c_1 och c_2 = materialkonstanter
 T = temperatur vid mätning
 T_{ref} = referenstemperatur

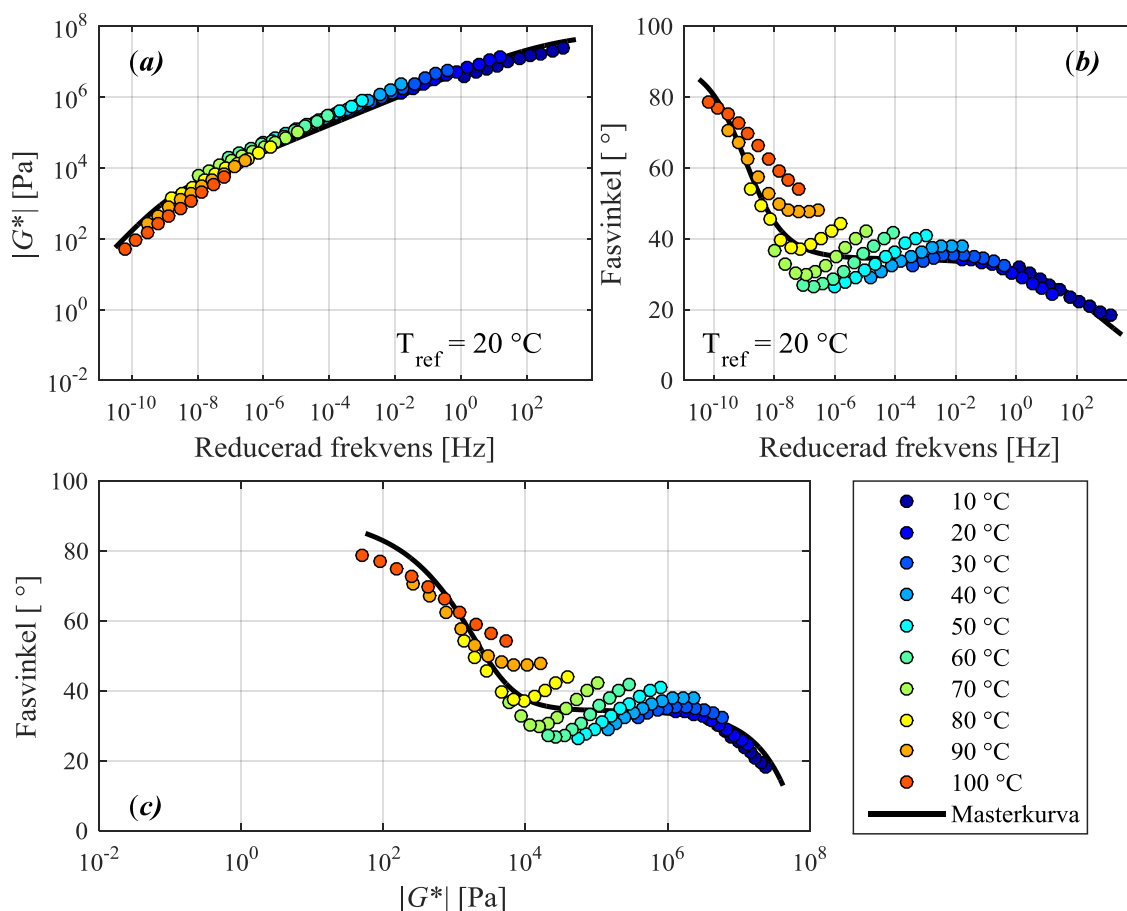
2S2P1D modellen som används till att bestämma masterkurvan kan alltså beskriva både den dynamiska modulen och fasvinkeln med bra noggrannhet som synes i Figur 9a och 9b. Figur 9c visar också att 70/100 bindemedlet till fullo stämmer överens med antagandet om ett termoreologiskt enkelt material. Detta kan ses genom att samtliga mätvärden i figur 9c följer en unik kontinuerlig kurva när den viskösa delen (fasvinkeln) plottas mot den elastiska delen (dynamisk skjuvmodul).



Figur 9. Komplex skjuvmodul för bindemedel 70/100 där figur (a) visar den dynamiska skjuvmodulen som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, (b) visar fasvinkeln som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, och figur (c) visar fasvinkeln som funktion av dynamisk skjuvmodul.

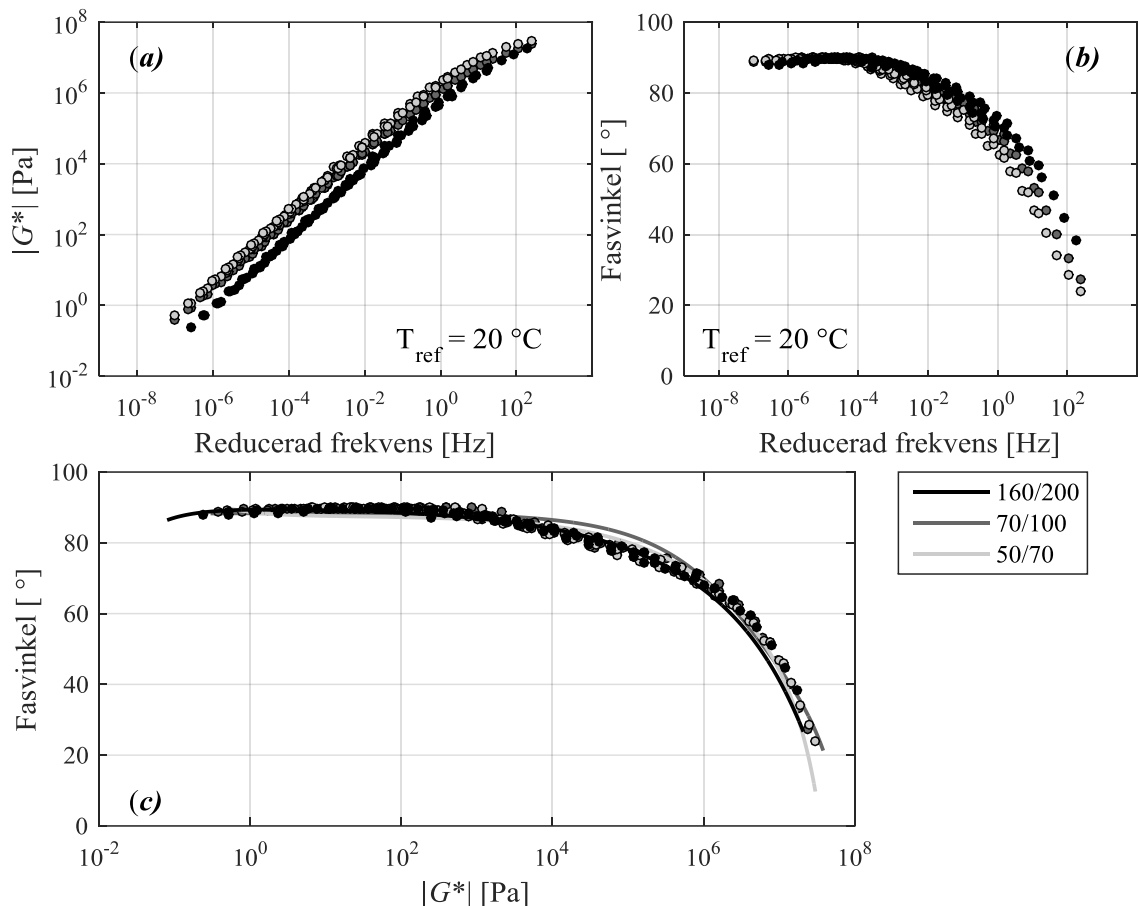
För polymermodifierade bindemedel gäller oftast inte materialantagandet som krävs för att bestämma en masterkurva noggrant fullt ut. Det har dock föreslagits av t.ex. Di Benedetto et al. (2004) att den dynamiska modulens masterkurva fortfarande kan uppskattas med relativt god noggrannhet. För polymermodifierade bindemedel har en s.k. partiell överensstämmelse med termoreologiskt enkelt materialbeteende utnyttjats för att uppskatta masterkurvor (Di Benedetto et al. 2004). Det innebär att en unik och kontinuerlig masterkurva erhålls enbart för den dynamiska modulen. Figur 10 visar den komplexa modulen och masterkurvan från 2S2P1D modellen för det polymermodifierade bindemedlet 25/55-80 C. Viktigt vid uppskattningen av en masterkurva är att mätvärden kan följas åt i en kontinuerlig kurva vilket alltså inte stämmer helt för fasvinkeln (se figur b). Däremot ger modellen en relativt god uppskattning av den dynamiska skjuvmodulen

samtidigt som en grov tendens av fasvinkelns variation över frekvens kan fångas. Detta innebär att konventionella och polymermodifierade bitumen kan jämföras med avseende på den dynamiska skjuvmodulens masterkurva som tydligt kan visa på skillnader i bindemedlens egenskaper.



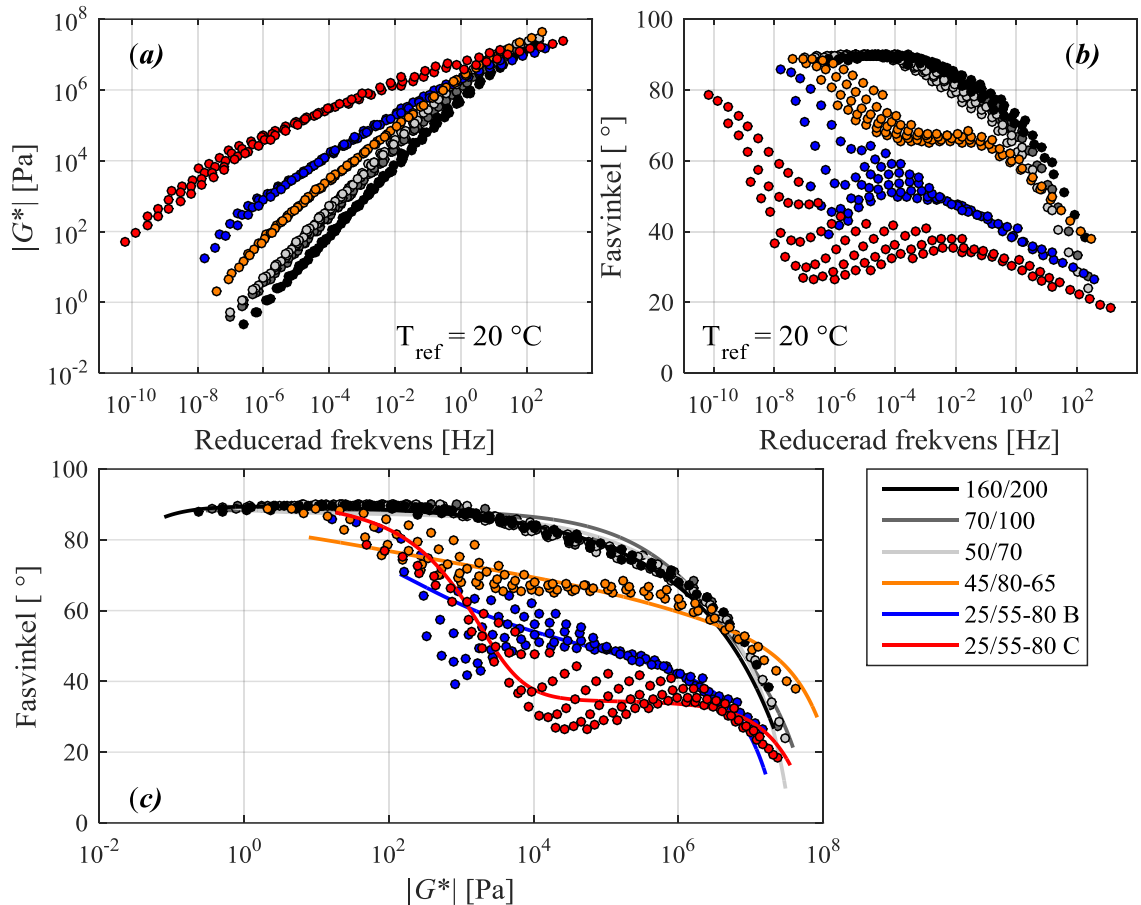
Figur 10. Komplex skjuvmodul för polymermodifierat bindemedel 25/55-80 C där figur (a) visar den dynamiska skjuvmodulen som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, (b) visar fasvinkeln som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, och figur (c) visar fasvinkeln som funktion av dynamisk skjuvmodul.

Figur 11 presenterar den komplexa modulen för samtliga konventionella omodifierade bindemedel. En liten skillnad mellan de olika bindemedlen kan ses för både den dynamiska skjuvmodulen och fasvinkeln. Trenden är genomgående med att ett hårdare bindemedel ger en något högre styvhet och något lägre fasvinkel. Resultaten från provningen är förväntade tillsammans med att ingen större skillnad i lutning mellan de tre bindemedlen är tydlig. Dessa bindemedel har alltså ett liknande beroende av temperaturer och belastningsfrekvenser. Figur 11c visar också att samtliga konventionella bindemedel stämmer överens med antagandet om ett termoreologiskt enkelt material som krävs för att noggrant uppskatta den komplexa modulens masterkurvor fullständigt.



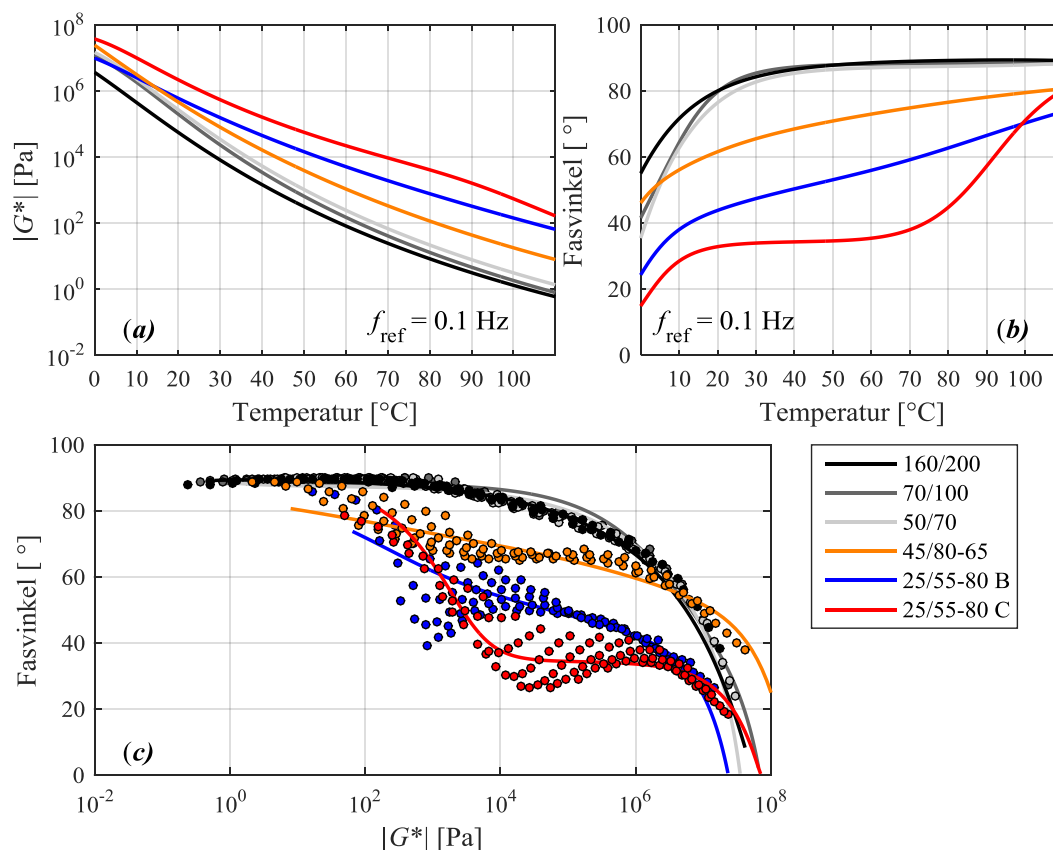
Figur 11. Komplex skjuvmodul för omodifierade penetrationsbindemedel där figur (a) visar den dynamiska skjuvmodulen som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, (b) visar fasvinkeln som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, och figur (c) visar fasvinkeln som funktion av dynamisk skjuvmodul.

I figur 12 presenteras den komplexa modulen av samtliga bindemedel. I denna figur är skillnaderna mellan polymermodifierade och omodifierade bindemedel tydliga. I figur 12a syns en viktig skillnad i lutningen på masterkurvorna. Ju mindre lutning desto mindre temperaturkänslig är bindemedlet vilket bör resultera i bättre sprick- och deformationsegenskaper. 45/80-65 har en högre styvhet än de omodifierade bindemedlen vid låga belastningsfrekvenser och höga temperaturer. Ännu tydligare och bättre prestanda har 25/55-80 B och framförallt 25/55-80 C som visar på markant förbättrade egenskaper vid höga temperaturer och statiska/lågsamma laster (låga frekvenser). Resultaten för 25/55-80 C visar även på en stor förbättring i jämförelse mot de övriga polymermodifierade bindemedlen. Tydligt är att de högmodifierade bindemedlen har en lägre temperaturkänslighet i jämförelse mot det lägre modifierade bindemedlet vilket stämmer väl överens med tidigare resultat av polymermodifierade material (Stenberg 2007). I figur 12b följer resultaten samma trend där bindemedlen med en högre dynamisk skjuvmodul istället visar en lägre fasvinkel. Den viskösa delen som bidrar till den plastiska deformationen är mindre vid lägre fasvinklar och 25/55-80 C ska alltså ha bättre motstånd mot permanenta deformationer i jämförelse mot de övriga bindemedlen enligt dessa resultat. I figur 12c är det dock tydligt att uppskattningen av fasvinkeln temperatur- och frekvensberoende masterkurva är något osäker för de polymermodifierade bindemedlen. En begränsning med dessa DSR komplexa modulmätningar är att modulen vid låga temperaturer $< 10\text{ °C}$ inte har mätts upp. Mätningar vid lägre temperaturer kan ge en bredare masterkurva som även ger en tydligare uppskattning av bindemedlens sprickmotstånd.



Figur 12. Komplex skjuvmodul för modifierade och omodifierade bindemedel där figur (a) visar den dynamiska skjuvmodulen som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, (b) visar fasvinkeln som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, och figur (c) visar fasvinkeln som funktion av dynamisk skjuvmodul.

Figur 13 visar samma jämförelse av bindemedlen som Figur 12. Skillnaden är att masterkurvorna av den dynamiska skjuvmodulen och fasvinkeln har plottats mot temperatur på x-axeln istället för frekvens och att en referensfrekvens används istället för en referenstemperatur. Figur 13a och 13b visar alltså hur den dynamiska skjuvmodulen och fasvinkeln varierar mellan 0 till 110 °C för en belastningsfrekvens på 0.1 Hz. Det kan uppfattas som opraktiskt att presentera styvheten vid sådana extrema temperaturer som t.ex. 100 °C eftersom detta är temperaturer som beläggningar normalt inte utsätts för. I sammanhanget av en masterkurva kan det dock samtidigt motsvara en "normal" temperatur vid en ännu lägre belastningsfrekvens än 0.1 Hz. Ett större temperaturspann ger alltså en bredare bild av bindemedlets egenskaper vid realistiska temperatur- och belastningsförhållanden.



Figur 13. Komplex skjuvmodul för modifierade och omodifierade bindemedel där figur (a) visar den dynamiska skjuvmodulen som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, (b) visar fasvinkeln som funktion av belastningsfrekvens och temperatur, och figur (c) visar fasvinkeln som funktion av dynamisk skjuvmodul.

5. ANALYS

Bindemedelsanalyserna av de polymermodifierade bindemedlen visade som förväntat på förbättrade egenskaper i jämförelse mot traditionella penetrationsbitumen. De högmodifierade polymerbindemedlen visar på en mycket god elasticitet trots att de är hårdare än de konventionella bindemedlen. Samtliga polymermodifierade bindemedel visar även på ett minskat beroende av temperaturer och belastningsfrekvenser vilket ger bättre egenskaper i olika typer av klimat i jämförelse mot de omodifierade bindemedlen.

5.1 Val av beläggningskonstruktioner

Valen av de slutliga materialen grundar sig inte enbart på de presenterade bindemedelsanalyserna. Hänsyn har även tagits till användning av material i andra forskningsprojekt. Till exempel så har samma polymer och inblandningsmängd (7.5 %) använts i USA på NCATs teststräcka. Kopplingen till andra erfarenheter har varit en viktig anledning till att 25/55-80 B valts ut till detta projekt trots att 25/55-80 C har visat på bättre resultat i bindemedelsprovningen. Till en provsträcka (P2) valdes ett styvare bitumen (50/70) genomgående i de olika lagren för att kunna göra en jämförelse mellan ett styvare och ett mjukare (P1) bärlager. Detta är en jämförelse av stort intresse eftersom det har diskuterats i många år om styvare eller mjukare bärlager är fördelaktigt i Sveriges klimat. Tabell 2 visar en sammanställning av de valda produkterna och de olika konstruktionernas uppbyggnad. Provsträckan inleds (i riktning österut från Ulricehamn) med en 500 m lång referenssträcka bestående av omodifierade bundna material med en tjocklek på 19 cm. Därefter följer fyra provytor där tjockleken på beläggningen reducerats med ett lager till 14 cm.

Tabell 2. Valda konstruktionstyper för provsträckan på riksväg 40

	500 m Referens	375 m P1	375 m P2	375 m P3	375 m P4
Slitlager 40 mm	ABS 16 70/100	ABS 16 70/100	ABS 16 50/70	ABS 16 Swebit 45/80-65	ABS 16 Swebit 25/55-80 B
Bindlager 50 mm	ABb 22 50/70	ABb 22 50/70	ABb 22 50/70	ABb 22 Swebit 45/80-65	ABb 22 Swebit 25/55-80 B
Bärlager 50 mm	AG 22 70/100	AG 22 160/220	AG 22 50/70	AG 22 Swebit 45/80-65	AG 22 Swebit 25/55-80 B
Bärlager	AG 22 160/220 (50 mm)	Obundet	Obundet	Obundet	Obundet

5.2 Dimensionering

Dimensionering av vägkonstruktioner i Sverige med en maximal trafik som överstiger 500 000 standardaxlar under den planerade livslängden utförs oftast i dimensioneringsklass (DK) 2. För att genomföra dimensioneringar enligt DK 2 skall samtliga ingående material uppfylla de specifikationer och krav som listas i Trafikverkets handlingar - TRVK Väg, TRV Geo, TRVKB Obundna lager, samt TRVKB Bitumenbundna lager. Det mekanistiskt-empiriska beräkningsprogrammet PMS Objekt, som är det enda standardiserade dimensioneringsverktyget i Sverige, följer dessa krav fullt ut. Detta program är kalibrerat med svenska trafik- och klimatförhållanden mot verkliga utfall och genom att använda sig av standardmaterial kan en rimlig uppskattning av en konstruktions livslängd erhållas. I DK 3 kan avsteg göras från de materialegenskaper (t.ex. styvhetsmodul) som specificeras i Trafikverkets handlingar. För denna dimensioneringsklass kan andra materialantaganden än linjär-elastisk teori (som antas i PMS objekt) utnyttjas, men det finns inga standardiserade metoder som med en viss säkerhet kan uppskatta konstruktionens livslängd. Eftersom nya bindemedel leder till andra styvhetsmoduler, innebär det att dimensioneringen av de alternativa konstruktionerna med modifierade bindemedel inte kan utföras med god tillförlitlighet i PMS Objekt. Denna dimensionering bör istället utföras med andra materialantaganden än linjär-elastisk teori i DK 3. I denna etapp har referenssträckan samt provsträckan innehållande konventionella material (P1) dimensionerats enligt DK 2 med hjälp av PMS Objekt. Ingen dimensionering av de alternativa beläggningsskonstruktionerna med polymermodifierade bindemedel har utförts, men de förbättrade bindemedelsegenskaperna antas leda till en förlängd livslängd i jämförelse mot provsträcka 1. Detta antagande följs upp i Etapp 1b och 1c av detta projekt. Utifrån en trafikprognos (Teknisk PM Trafik 2009-08-07, Arbetsplan för Väg 40 Borås – Ulricehamn) har följande trafikmängder uppskattats:

- ÅDTk tung trafik = 750
- Antagen trafikförändring lastbilar per år = 2.2 %
- B-faktor = 2

Den beräknade trafikbelastningen utifrån dessa parametrar blir enligt följande:

- Ekvivalent antal standardaxlar (N_{ekv}) = 13 869 549
- $N_{ekv} \cdot 2 = 27\,739\,098$
- Största tillåtna vertikala trycktöjning i terrassytan = $2400\,\mu\epsilon$

I Tabell 3 presenteras dimensioneringsresultaten för referenssträckan och provsträcka 1. Baserat på den uppskattade trafikmängden uppskattas referenssträckan bestående av 19 cm bundna lager få en livslängd på omkring 26 år, medan provsträcka 1 (14 cm bundna lager) beräknas få en livslängd på omkring 10 år. För referenssträckan är det töjningen i terrassytan som begränsar livslängden medans livslängden för P1 blir i stort sett lika för töjning i underkant bitumenlager och i terrassytan.

Tabell 3. Dimensioneringsresultat för referenssträcka och provsträcka 1

Sträcka	Referens	P1		
<i>Terasstyp</i>	<i>1 – fast berg</i>	<i>1 – fast berg</i>		
Slitlager (mm)	40	40		
Bindlager (mm)	50	50		
Bärlager (mm)	100	50		
Obundet bärlager (mm)	80	80		
Förstärkningslager (mm)	200	250		
			Beräknad trafikmängd	
Maximalt antal standardaxlar – Töjning underkant bitumenlager	28 633 312	6 982 145	>	13 869 549
Maximalt antal standardaxlar – Töjning i terrassytan	36 081 531	13 328 207	>	27 739 098
Beräknad vertikal trycktöjning i terrassytan enstaka last ($\mu\epsilon$)	667	863	<	2400

6. SLUTSATS

Provmetoderna som utfördes i Dynamic Shear Rheometer innehåller relevant information som ökar förståelsen för bindemedlens egenskaper i olika klimat och för olika belastningstyper. Viktiga skillnader i bindemedlens egenskaper är mycket svåra att identifiera via den kompletta bindemedelsanalysen enligt Trafikverkets specifikationer (TRVKB 10 Bitumenbundna lager, TDOK 2011:266). MSCR och framförallt provningen av den komplexa skjuvmodulen tydliggör viktiga skillnader mellan modifierade och omodifierade bindemedel. En rangordning av bindemedlen har kunnat bestämmas utifrån dessa tester och en fortsatt uppföljning av provvägen kommer att visa hur väl det stämmer överens med verkligheten. Av de utvalda materialen förväntas sträckan med bindemedlet 25/55-80 B prestera bäst i jämförelse mot de övriga provsträckorna med reducerad tjocklek (14 cm). Konstruktionen med bindemedel 45/80-65 förväntas prestera näst bäst i samma jämförelse. Inget antagande om hur de fyra provsträckorna med en tjocklek på 14 cm kommer att stå sig i jämförelsen mot referenssträckan med en tjocklek på 19 cm görs utifrån dessa analyser. Detta följs upp med intresse i kommande långtidsuppföljning.

LITTERATURFÖRTECKNING

Asphalt Institute, (2010). "Implementation of the Multiple Stress Creep Recovery Test and Specification", Asphalt Institute Guidance Document.

Di Benedetto, H., Olard, F, Sauzéat, C., Delaporte, B. (2004). "Linear viscoelastic behaviour of bituminous materials: From binders to mixes", Road Materials and Pavement Design, 5:sup1, 163-202.

Ekblad, J., Lundström, R. (2014). "Provväg Skänninge, 2:Inledande mätningar, material och vägyta", NCC Rapport 2014-02, SBUF projekt 12760.

Lu, X., Said, S., Carlsson, H., Soenen, H., Heyrman, S., Redelius, P. (2014). "Performance Evaluation of Polymer Modified Bitumens on a Heavily Trafficked Test Road", Journal of Pavement Research and Technology, Vol. 7, No. 6, 381-388.

Kluttz, R. Q., Molenaar, A. A. A, Van de Ven, M.F.C, Poot, M.R, Liu, X, Scarpas, A. and Scholten, E.J. (2009). "Modified Base Courses for Reduced Pavement Thickness and Improved Longevity", Proceedings of the International Conference on Perpetual Pavement, October, 2009, Columbus, OH.

Roque R., Birgisson B., Drakos C. and Sholar G. (2005). "Guidelines for use of modified binders", Final Report 4910-4504-964-12, University of Florida.

Said, F. S., Carlsson, H., Viman, L., Nordgren, T. (2014). "Provsträckor med gummi-asfalt – Ragn-Sells infart vid granulát-anläggningen, Heljestorp", VTI rapport 803.

Scholten, E. J., Timm, D. H., Willis, J. R., Powell, R., Kluttz, R. Q., Vonk, W. C. (2011). "Accelerated loading test results of two NCAT sections with highly modified asphalt", Australian Asphalt Paving Association fourteenth international flexible pavements conference: sustainable roads, 25th - 28th September, Sydney, New South Wales, Australia.

SS-EN 1426:2007 "Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av penetration", 2007-03-22.

SS-EN 1427:2007 "Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av mjukpunkt – Kula och Ring- metoden", 2007-03-22.

SS-EN 13398:2010 "Bitumen och bituminösa bindemedel – Bestämning av elastisk återgång för modifierat bitumen", 2010-06-07.

Stenberg, N. (2007). "PMB – Inverkan på asfaltbeläggningens funktionella egenskaper", SBUF Projekt 11692.

Timm, D. H., Robbins, M. M., Kluttz, R. (2011). " Full-Scale Structural Characterization of a Highly-Polymer-Modified Asphalt Pavement, 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board.

Timm, D. H., Robbins, M. M., Tran, N., Rodezno, C. (2014). "Flexible Pavement Design – State of the Practice", NCAT Report 14-04, Auburn University

Von Quintus, H. L., Mallela, J., Buncher, M. (2007). "Quantification of Effect of Polymer-Modified Asphalt on Flexible Pavement Performance", Journal of the Transportation Board No. 2001, pp 141-154.

Williams, M. L., Landel, R. F., and Ferry, J. D. (1955). "The temperature dependence of relaxation mechanisms in amorphous polymers and other glass-forming liquids," J. Am. Chem. Soc., Vol. 77, 3701.